

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH PRACOVIŠTĚ PRO ŘEZÁNÍ TVAROVÝCH OBJEKTŮ Z
POLYSTYRENU PRŮMYSLOVÝM ROBOTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB MACEK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH PRACOVISTĚ PRO ŘEZÁNÍ TVAROVÝCH OBJEKTŮ Z POLYSTYRENU PRŮMYSLOVÝM ROBOTEM DESIGN OF A WORKPLACE FOR POLYSTYRENE OBJECTS CUTTING BY INDUSTRIAL ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB MACEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ALEŠ POCHYLÝ

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Macek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh pracoviště pro řezání tvarových objektů z polystyrenu průmyslovým robotem

v anglickém jazyce:

Design of a workplace for polystyrene objects cutting by industrial robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je návrh koncepce robotického pracoviště pro řezání tvarových objektů z polystyrenu prostřednictvím odporového drátu. Hlavní náplní práce je návrh koncového efektoru, který bude umožňovat aktivní napínání odporového drátu. Dalším úkolem je sestavení simulačního modelu pracoviště pro stanovené objekty v dostupném softwaru pro CAD/CAM programování průmyslových robotů.

Cíle bakalářské práce:

1. Návrh koncepce pracoviště.
2. Návrh koncového efektoru pro řezání polystyrenu pomocí odporového drátu s možností napínání drátu.
3. Sestavení simulačního modelu pracoviště pro stanovené vzorové objekty v dostupném systému pro CAD/CAM programování průmyslových robotů.

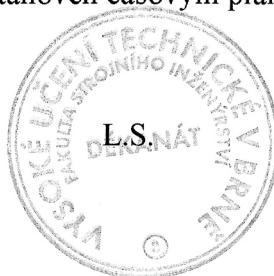
Seznam odborné literatury:

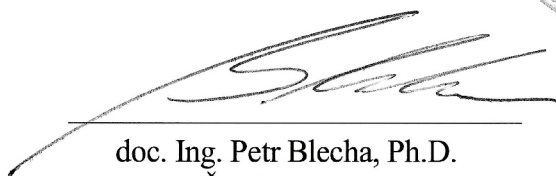
1. SICILIANO, B. KHATIB, O. Springer Handbook of Robotics. Springer-Verlag New York, Inc., 2008. 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4
2. PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2008. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
3. NOF, S. Y. Springer Handbook of Automation. Springer, 2009. 1812 s. ISBN 978-3-540-78830-0
4. MONKMAN, G. J., HESSE, S., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Robot Grippers. Wiley-VCH Verlag, 2007. 463 s. ISBN 978-3527406197
5. KUKA System Software, Operating and Programming Instructions, v.1.1, 2006
6. KUKA System Software, Expert Programming, Release 5.2, 2006
7. Mastercam X5 - Robotmaster V5 Reference Guide, 2010

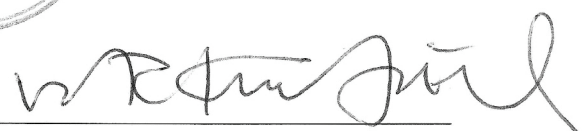
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Pochylý

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 19.12.2012




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá především konstrukčním řešením koncového efektoru pro řezání tvarových objektů z polystyrenu průmyslovým robotem. V práci je popsána podstata způsobů řezání polystyrenu, volba vhodného typu robota, konstrukce efektoru s možností napínání drátu, návrh pracoviště a výsledky měření přesnosti zkonstruovaného efektoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průmyslový robot, řezání, polystyren, odporový drát, efektor

ABSTRACT

This Bachelor thesis mainly focuses on the construction of the effector for cutting complex shapes made of polystyrene by an industrial robot. This thesis describes various methods of cutting polystyrene, the choice of the right type of robot, construction of the effector with the possibility of tensing the wire, workplace suggestion, as well as the results of accuracy and precision measurements of the constructed effector.

KEYWORDS

Industry robot, cutting, polystyrene, resistance wire, effector

MACEK, J. Návrh pracoviště pro řezání tvarových objektů z polystyrenu průmyslovým robotem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Pochylý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh pracoviště pro řezání tvarových objektů z polystyrenu průmyslovým robotem“, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Poděkování

Děkuji Ing. Aleši Pochylému a Ing. Tomáši Kubelovi za trpělivost a obětovaný čas při konzultacích a měření výsledků. Dále děkuji Ľubici Horváthové a Ing. Daně Horváthové za přínosné připomínky k této práci. V neposlední řadě děkuji svým rodičům a prarodičům za dlouhodobou podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	3
1 Řezání EPS a XPS	5
1.1 EPS a XPS	5
1.2 Mechanické vlastnosti EPS a XPS	5
1.3 Způsoby řezání EPS	6
1.3.1 Břitem	6
1.3.2 Pilou	6
1.3.3 Horkou strunou nebo hrotem	6
1.4 Odporové dráty	7
2 Průmyslový robot	9
2.1 Nejpožívanější typy průmyslových robotů a jejich využití v praxi	9
2.1.1 6 DOF	9
2.1.2 4 DOF	9
2.1.3 3 DOF	10
2.2 Programování průmyslových robotů	13
2.2.1 On-line	13
2.2.2 Off-line	13
2.3 Aplikace technologie s průmyslovým robotem	15
2.3.1 Volba způsobu řezání	15
2.3.2 Volba typu robotu pro řezání EPS	15
2.3.3 Volba způsobu programování	15
3 Návrh efektoru	17
3.1 Koncepce efektoru	17
3.1.1 Bez napínání	17
3.1.2 Napínání pružinou	18
3.1.3 Napínání pneumatickým válcem	18
4 Pracoviště	25
4.1 Hlavní použité komponenty	25
4.1.1 Robot	25
4.1.2 Efektor	26
4.2 Sestava	26
4.3 Výsledky	27
4.3.1 Teplotní dilatace	27
4.3.2 Teoretická přesnost	29
4.3.3 Řezání robotem	32
Závěr	35
Literatura	37
Seznam obrázků	39
Seznam tabulek	41

Seznam symbolů a veličin	43
Seznam příloh	45

ÚVOD

V posledních letech průmyslové roboty získávají stále větší zastoupení v průmyslu. Výhody, jež poskytují, jim nelze upřít a tak se jejich využití neustále rozšiřuje. Využití robotu jako stroje pro vytváření modelů z polystyrenu je však poměrně novou záležitostí. Ačkoliv pro řezání polystyrenu je již množství zařízení, na robotizaci této disciplíny je stále mnoho co zlepšovat.

Cílem této práce je navrhnout technologii pro řezání polystyrenu průmyslovým robotem. Tato problematika zahrnuje návrh koncepce pracoviště, návrh efektoru, sestavení pracoviště a praktické ověření funkce efektoru při řezání polystyrenu. Jako základ posloužil prototyp efektoru R. Dvořáka [17] z roku 2012. Účelem této práce je především modifikace stávající konstrukce za účelem zvýšení přesnosti řezání a zvětšení pracovního prostoru efektoru.

První kapitola se zabývá vlastnostmi EPS a XPS a způsoby jejich řezání.

V druhé kapitole jsou stručně popsány základní druhy robotů včetně jejich výhod a nevýhod pro účely řezání polystyrenu a způsoby jejich programování.

Třetí kapitola popisuje různé možnosti konstrukce efektoru, od konstrukce bez napínání, přes napínání pomocí předpnuté pružiny až po využití pneumatického válce. Dále je zde popsána konečná konstrukce efektoru, který byl dále testován.

Výsledky těchto měření, jako i popis celkové sestavy robot-efektor se zabývá čtvrtá kapitola. Nejdůležitějším poznatkem bylo především zjištění součinitele teplotní dilatace a změna přesnosti při řezání.

1 ŘEZÁNÍ EPS A XPS

Protože se polystyren (ať už EPS či XPS) prodává ve formě tabulí, pro získání jiných tvarů či rozměrů je nutné jej rozřezat podle dalšího využití. Vlastnosti, stejně jako i způsoby řezání EPS a XPS budou rozebrány v této kapitole.

1.1 EPS a XPS

EPS¹ a XPS² se běžně používají jako tepelně či zvukově izolační materiály. Pro potřeby této práce jsou tyto materiály vhodné především díky množství různých pevností v tlaku (běžně se udávají jako trojčíferné číslo za označením materiálu – např. XPS300 znamená napětí v tlaku 300kPa), závislých na sytné hmotnosti³ a způsobu výroby (XPS je obecně pevnější, než EPS). Tyto materiály jsou, díky svým mechanickým vlastnostem, ideální pro tvorbu modelů [1]).

Na stavbu modelů je také (podle [4]) vhodný EPP⁴, jehož mechanické vlastnosti jsou lepší než nabízí EPS nebo XPS. Vzhledem k jeho horší dostupnosti na českém trhu se v dalším textu zaměříme pouze na EPS a XPS.

Surovina pro výrobu EPS i XPS je polystyren ve formě perel, které obsahují 6-7% pentanu, který slouží jako nadouvadlo. Perly jsou dodávány výrobcům EPS v několika velikostních skupinách v závislosti na následné aplikaci. Rozdíl mezi EPS a XPS spočívá v postupu výroby. Zatímco EPS je nejprve předpěněn a následně se „nafukuje“ do formy[1], desky XPS vznikají protlačováním materiálu formou (čímž se snižuje nasákavost materiálu) [2]. Rozdíl je také v užitém nadouvadle, zatímco pro EPS se využívá vodní páry, pro nadouvání XPS se používá CO₂.

1.2 Mechanické vlastnosti EPS a XPS

Mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů jsou poměrně velkou neznámou, možná i pro samotné výrobce, kteří u svých výrobků uvádějí pouze napětí v tlaku při stlačení (ať už 2%, 10%, či 20%). Toto platí především pro XPS, vlastnosti EPS byly poměrně podrobně popsány v článku [1] na stránkách informačního serveru TZB-info. Jak vychází z diagramu tahu, tlaku a napětí v ohybu v závislosti na objemové hmotnosti (obr.1.1), s narůstajícím množstvím perel v m³, roste pevnost ve všech těchto veličinách.

Pro porovnání vlastností EPS s XPS však zůstává pouze veličina napětí v tlaku. Na českém trhu jsou běžně k dostání v pevnostech 200, 300 a 500 kPa [5]. Vzhledem k faktu, že složení EPS i XPS je totožné a rozdíl je pouze ve výrobě, dalo by se předpokládat, že lineární trend růstu pevnosti v tlaku i ohybu bude pokračovat i u těchto materiálů.

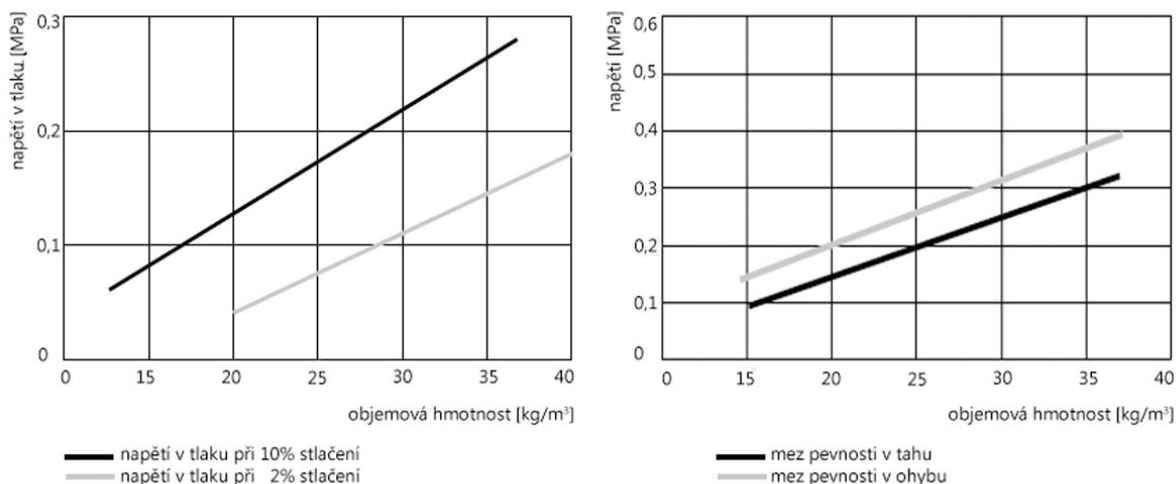
Obecně platí, že pevnost XPS je vyšší než EPS, závislost této pevnosti na objemové hmotnosti však není známá.

¹zpěňovaný – expandovaný polystyren

²protlačovaný – extrudovaný polystyren

³veličina udávající hmotnost perel na metr krychlový [$kg \cdot m^{-3}$]; u homogenních materiálů používáme termín *hustota*

⁴extrudovaný polypropylen



Obrázek 1.1: Graf napětí v tlaku při 2% a 10% stlačení zkušebních těles z EPS (vlevo); graf pevnosti v tahu a pevnosti v ohybu u zkušebních těles z EPS (vpravo), v závislosti na objemové hmotnosti (převzato z [1]).

1.3 Způsoby řezání EPS

Technologií pro dělení polystyrenu, ať už ve formě EPS nebo XPS, je několik, v následujících odstavcích jsou představeny ty nejdůležitější.

1.3.1 Břitem

Tato technologie spočívá v řezání materiálu ostrým břitem. Jedná se o jednoduchou metodu, která má však řadu nevýhod. Při jejím využití vzniká velké množství odpadu. Během řezání se mohou některé perly vydrolit, čímž vzniká nerovný povrch, který je při některých aplikacích nevhodný. Limitujícím faktorem je dále tloušťka materiálu. Praktické využití této technologie je vhodné do 2–4cm tloušťky materiálu, při větších tloušťkách je kvůli narůstajícímu tření nutné vyvinout větší sílu, která je při manuálním řezání většího množství nepříjemná.

1.3.2 Pilou

Využití pily pro řezání je velice podobné, jako řezání břitem. Avšak oproti řezání břitem má několik výhod a několik nevýhod. Výhodou je snadnější řezání – použití pily není omezené na tloušťku materiálu. Při řezání pilou však vzniká velké množství pilin a drobného polystyrenového prachu, se kterým se poměrně špatně pracuje. Navíc se během řezání z řezaného povrchu vydroluje značné množství perel, čímž opět vzniká nerovný povrch.

1.3.3 Horkou strunou nebo hrotem

Řezání horkou strunou se využívá již při výrobě, kdy se kvádry zpěněného polystyrenu⁵ řežou na užší desky.[1] Ty se pak využívají například pro výše zmíněné zateplování.

⁵polystyren ve finálním zpracování, kdy jsou jednotlivé perly svařeny k sobě během výrobního procesu

Základním předpokladem pro řezání horkou strunou je nízká teplota tavení (pro polystyren se pohybuje kolem 100° C). Tuto schopnost mají především syntetické materiály, avšak použití technologie řezání tavením je omezeno pouze pro použití na těžko hořlavých tuhých (pevných) expandovaných nebo pěnových polystyrenových materiálech, které vyhovují referenční německé normě DIN 4102 nebo normě ČSN EN 13501-1.[6]

Výhodou této technologie je bezesporu čistota, protože je materiál oddělován tavením, řezaná plocha je hladká, bez děr po vydrolených perlách - povrch řezu je okamžitě zataven. Dalšími výhodami jsou tichost, tenká linie řezu, hmotnost celého nástroje, jeho jednoduchost a bezesporu i cena, která se odvíjí od konstrukce nástroje. Nevýhodou jsou pak zplodiny, vznikající při tavení EPS, které však nejsou nijak škodlivé (podle [3]). Pro řezání desek je pak možné využít řezání žhavým hrotem, tento způsob je však omezen tloušťkou materiálu kvůli konstrukci hrotu. Tento způsob je vhodný především pro modelářství na úrovni hobby.

1.4 Odporové dráty

Na českém trhu je k dostání řada odporových drátů různého složení a různých vlastností, v následující tabulce si představíme zástupce těchto skupin. Materiál, který je vhodný pro řezání polystyrenu, musí splňovat několik předpokladů. Hlavním z nich je dostatečná pracovní teplota, polystyren je vhodné řezat drátem o teplotě 150-200° C (teplota je závislá na rychlosti řezání).

Označení	Složení	Dostupné průměry	Maximální pracovní teplota
Konstantan	54% Cu 45% Ni 1% Mn	0,18; 0,2; 0,3; 0,355	500°C
Kanthal	Fe Cr Al Co	0,18; 0,5; 0,65; 0,8; 0,85; 1,2	1200°C
Isotan	55% Cu 44% Ni 1% Mn	0,18; 0,25	600°C
Manganin	86% Cu 12% Mn 2% Ni	0,1; 0,28; 0,4; 0,56	140°C
Cu56 Ni44	56% Cu 44% Ni	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0	?

Tabulka 1.1: Přehled odporových drátů a jejich vlastností pro ϕ 0,5mm (převzato z [18])

Jak vyplývá z tabulky 1.1, některé materiály jsou pro řezání vhodné, některé však ne. Například Manganin je svou nízkou pracovní teplotou nevhodný. Pro účely této práce jsou vhodné materiály Konstantan, Kanthal a Isotan. Konstantan a Isotan jsou však dostupné pouze v malém množství průměrů, tím vzniká nutnost přesného regulování napětí a proudu zdroje, aby se drát nepřepálil. Navíc by drát měl mít dostatečnou pevnost, aby vydržel síle vyvinuté napínáním. Proto využijeme Kanthalový odporový drát, jehož pracovní teplota je pro naše účely dostatečná a je k dostání v různých průměrech.

2 PRŮMYSLOVÝ ROBOT

Průmyslový robot je automaticky kontrolovaný, předprogramovaný, mnohoúčelový manipulátor, programovatelný ve třech nebo více osách. [7] Využití průmyslových robotů má mnohé výhody. Pro firmy je především zajímavé zvýšení produktivity výroby. Produktivitu zvedá hlavně rychlost, přesnost manipulace nebo obrobení a absence přestávek během práce, které robot zkrátka nepotřebuje. Vhodné je dále použití robotů v místech, kde pro lidskou obsluhu není bezpečno – příkladem mohou být například chemické laboratoře, ve kterých je pravděpodobná manipulace s nebezpečnými látkami. Mezi běžné oblasti, kde se využívaly roboty již před 20 lety, patří například svařování, manipulace, paletizace, plastikářství, obsluha lisů tlakového lití, ošetřování formy, automatizace kovací lisů, apretace (odhroťování, odjehlení) či lakování. Mimo to v posledním desetiletí proniká i do oblastí méně běžných, jako jsou solární technika, dřevařství a jiné. [13]

Drtivé množství průmyslových robotů můžeme označit za tzv. robotické paže (robot se sériovou kinematikou).

2.1 Nejpoužívanější typy průmyslových robotů a jejich využití v praxi

Základní dělení průmyslových robotů je založeno na počtu stupňů volnosti, jinými slovy stupně volnosti (DOF¹) označují počet os nebo směrů, ve kterých je robot schopen se pohybovat. Existují různé druhy průmyslových robotů, ty nejpoužívanější jsou popsány v následujících odstavcích.

2.1.1 6 DOF

Šesti-osý robot, neboli robotická paže s 6 stupni volnosti se skládá (jak je vidět na obr. 2.1) ze 6 os, kolem kterých rotují jeho ramena. Tato konstrukce zajišťuje dostatečnou pohyblivost pro potřebnou flexibilitu robotu. Nevýhodou je však nízká tuhost, oproti obráběcím strojům, která se odvíjí od konstrukce. Z tohoto důvodu není robotická paže vhodná jako obráběcí stroj pro tvrdé materiály. Na druhou stranu měkké materiály (plasty, pěny, atd.) dokáže obrábět velmi přesně a díky pohyblivosti je schopen vytvořit modely, kterých by bylo běžnými obráběcími stroji dosahováno velmi obtížně.

Využití v praxi je kvůli značné flexibilitě tohoto typu robotu velmi univerzální. Omezujícím faktorem je především hmotnost, kterou robot unese (tzn. koncový efektor + manipulovaná součást). Jak již bylo řečeno výše, šesti-osý průmyslový robot se již dlouhá léta využívá ve svařování, manipulaci, plastikářství, dále jako obsluha lisů tlakového lití, při ošetřování formy, apretaci či lakování [13]. Stručně řečeno, všude tam, kde je potřebný přesně určený sled úkonů.

2.1.2 4 DOF

Čtyř-osé roboty jsou běžně nazývány také jako paletizační a to kvůli absenci 5. a 6. osy v porovnání se šesti-osým robotem. Absence těchto dvou os zapříčiňuje, že příruba robotu

¹DOF – zkratka z anglického „degrees of freedom“

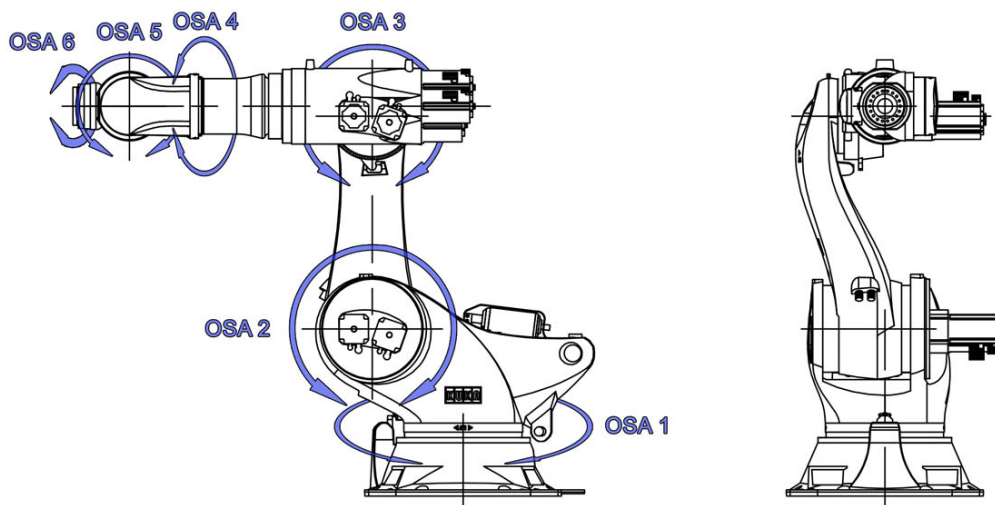
je stále rovnoběžná se základnou, proto se tento typ robotů hodí nejvíce pro paletizaci – čili pro přemísťování produktů z místa na místo. Kvůli tomu výrobci volí odlišný přístup ke konstrukci robotu (odlišná konstrukce je evidentní na obr. 2.2), která má obecně vyšší nosnost a je celkově více uzpůsobena pro transport předmětů než šesti-osý robot. Podkategorii paletizačních robotů tvoří roboty typu SCARA (obr. 2.3), který je určen pro manipulaci s drobnými předměty.

V praxi (jak již bylo nastíněno výše) se paletizační robot využívá pro transport předmětů z místa A do místa B. Pro názornost lze uvést příklad paletizačního robotu, který na konci dopravníku uchopí plechovky a přemístí je na paletu vedle.

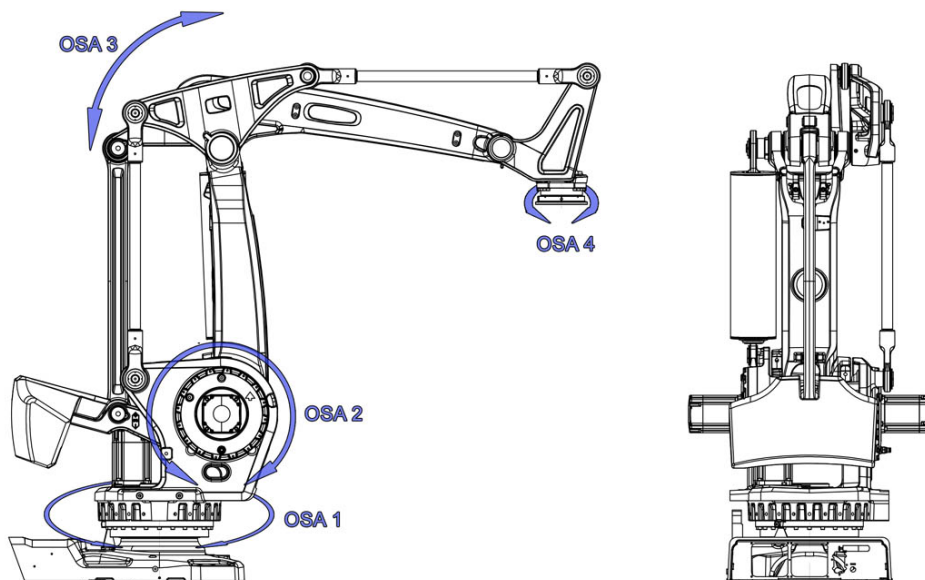
2.1.3 3 DOF

Do této kategorie patří robot, který se od předchozích liší především konstrukcí. Zatímco předchozí kategorie můžeme zařadit mezi robotické paže, ve kterých je využita sériová kinematika, u těchto robotů (tzv. DELTA) se využívá kinematika paralelní (odlišnost konstrukce je patrná na obr. 2.4). To přináší těmto robotům řadu výhod, především rychlost a přesnost. Na druhou stranu tuhost konstrukce je podstatně nižší než u klasické sériové kinematiky. Další nevýhodou je poměrně malý pracovní prostor vůči velikosti těla robotu.

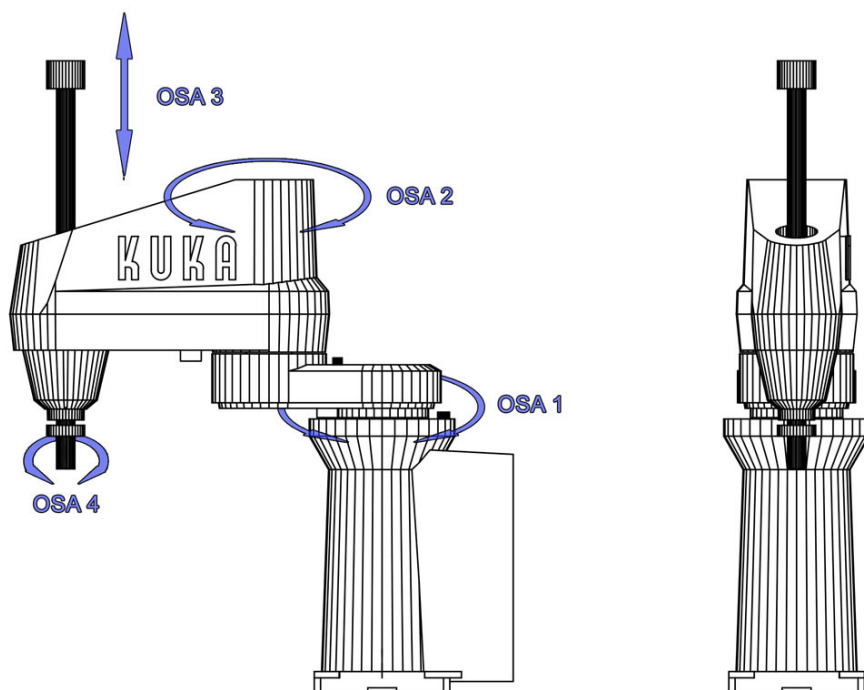
V praxi tento robot většinou najdeme na balicích linkách, kde si již vydobyl své čestné místo. Může za to především jeho rychlost, se kterou je schopný se pohybovat po své pracovní ploše. Pro potravinářský průmysl je určen robot tzv. třídy „Clean room“, který disponuje všemi certifikáty potřebnými pro manipulaci s potravinami.[15]



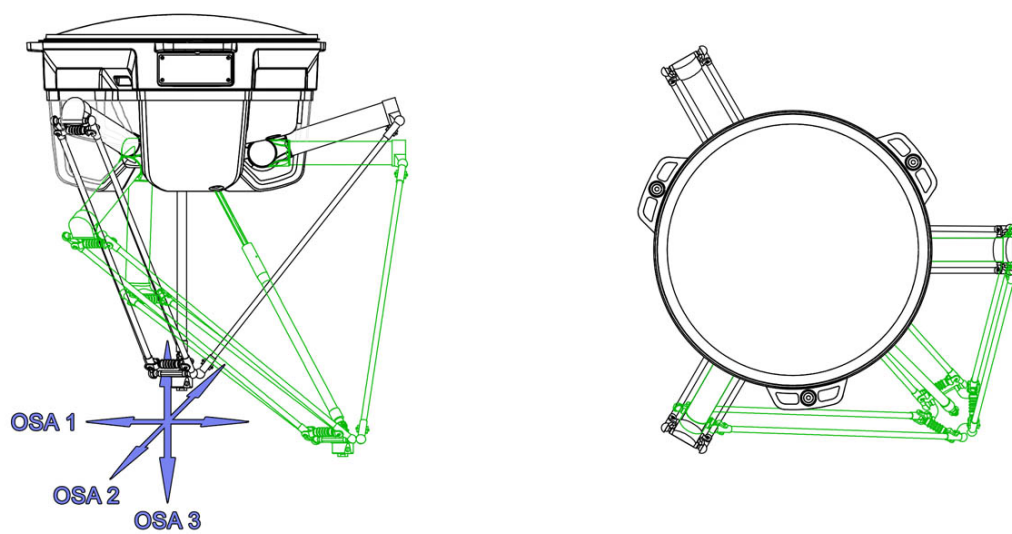
Obrázek 2.1: Schéma šesti-osého robotu – pohled z boku (vlevo) a zepředu (vpravo) (převzato z [14])



Obrázek 2.2: Schéma čtyř-osého paletizačního robotu – pohled z boku (vlevo) a zezadu (vpravo) (převzato z [15])



Obrázek 2.3: Schéma čtyř-osého robotu typu SCARA – pohled z boku (vlevo) a zepředu (vpravo) (převzato z [14])



Obrázek 2.4: Schéma robota DELTA z boku (vlevo) a shora (vpravo)(převzato z [15])

2.2 Programování průmyslových robotů

Aby mohl robot vykonávat svou činnost, musí být řádně naprogramován. Programování jako takové, lze rozdělit na 2 základní typy, kterými se budeme zabývat podrobněji.

2.2.1 On-line

On-line programování by se dalo označit jako základní zadání pro robot. Jedná se o nej-jednodušší zadání bodů, kterými má robot projet. Zadávání programu probíhá pomocí zařízení, které se nazývá „teach-pendant“. Jak je vidět na obrázcích 2.5 a 2.6 konstrukce teach-pendantů je různá, u všech (ať už jde o variantu pouze s dotykovým displayem nebo s ovládáním pouze tlačítky) je ale jasně viditelný nouzový vypínač.

Jak již bylo řečeno, pomocí teach-pendantu se dá robot naprogramovat pouze na určitou trasu, používat cykly a podmínky. Složitější pohyb, který je nutný například pro obrábění, je však značně náročný především na výpočet trajektorie nejen efektoru, ale i natočení jednotlivých os. Pro lidskou obsluhu je programování na této úrovni nereálné.

Pomocí teach-pendantu však nemusíme pouze programovat, ale také sledovat aktuálně probíhající program, případně měnit parametry robotu. [12] Toto je vhodné například při řešení problémů s jedním konkrétním robotem.

2.2.2 Off-line

Programování off-line by se dalo označit také za metodu „na nečisto“. Při samotném programování totiž není robot vůbec potřebný, vše totiž probíhá jako simulace v počítači. To přináší řadu výhod a to především v přehlednosti a množství doplňkových funkcí, kterými on-line programování nedisponuje. Je to především proto, že při off-line programování je možné využít CAD model vyráběné součásti, se kterou je poté možné manipulovat nebo ji obrábět.

Pro off-line programování není nutné znát jazyk, kterým se do robotu zadávají body trasy, ve většině případů každý program využívá svůj vlastní jazyk, který se pak pomocí překladače přeloží do jazyku, kterému robot rozumí.

Další výhodou off-line programování je kontrola správného nastavení trasy. Program totiž dokáže ve 3D zobrazit jak robota (většinou z vnitřní knihovny), tak i obrobek, se kterým má manipulovat (importovaný CAD model) a pomocí animace ukázat pohyby robota. Tímto způsobem se dá snadno ověřit, zda robot do něčeho nenarazí a nepoškodí tak díl, své okolí, nebo sám sebe.

V neposlední řadě dokáže software mnohem lépe (než integrovaný software robota) vyhodnotit daný pohyb (i z hlediska nákladu – efektoru, obrobku, atd.) a tak uzpůsobit celkový pohyb, aby byl pro robot co nejvýhodnější. [12]

Využití CAD modelu

Jak již bylo řečeno výše, programy pro simulaci robotů dokáží pracovat s CAD modelem a je to také základním předpokladem pro zjednodušení a zkvalitnění práce operátora. A to jak s CAD modelem robotu (který je samozřejmostí), tak i efektoru a samotným obrobkem. To robotu rozšiřuje možnosti využití především na poli robota coby obráběcího stroje. Software totiž dokáže spočítat potřebné natočení jednotlivých os robotu, aby byl efektor nastaven na přesnou polohu a natočení, které je pro obrábění nezbytné. [12]



Obrázek 2.5: Ukázka teach-pendantu s klasickým tlačítkovým ovládáním, kde se display využívá pouze pro zobrazování informací. a) Teach-pendant od firmy Fanuc (vlevo)[10], b) Teach-pendant firmy IGM(vpravo)[9].



Obrázek 2.6: Ukázka teach-pendantu s dotykovým ovládáním, kde se pomocí displaye zadávají data. a) Teach-pendant firmy ABB(vlevo) [8], b) Teach-pendant firmy TecnoMatic[11].

2.3 Aplikace technologie s průmyslovým robotem

2.3.1 Volba způsobu řezání

V kapitole 1.3 bylo přiblíženo několik možností řezání EPS a XPS, pro účely této práce nejsou však vhodné všechny.

Břitem nebo pilou jsou vzorové příklady řezání EPS, které jsou pro využití na průmyslovém robotu nepoužitelné. I když je robot dostatečně silný na řezání břitem, pro tuto metodu je potřebný cit a určitá forma zpětné vazby (aby se břit nezlomil). Těmito vlastnostmi však robot nedisponuje.

Horkým hrotem je metodou (z určitého hlediska) podobného řezání břitem. I když hrot bude mít vyšší pevnost v ohybu než břit, je jeho využití s průmyslovým robotem nevhodné. Jedním z omezujících faktorů je délka břitu (jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.3). Požadovaná efektivní šířka efektoru byla zvolena na 800mm (více v kapitole 3.1.3), takového rozměru by pomocí hrotu nebylo možné dosáhnout.

Horkým drátem je poslední popsanou metodou v kapitole 1.3. Tato metoda splňuje všechny požadavky kladené na dělení EPS a XPS, které vyvstávají ze zvolené koncepce efektoru. Jedinou nevýhodou je teplotní dilatace drátu, kterou bude nutné kompenzovat.

2.3.2 Volba typu robotu pro řezání EPS

V kapitole 2.1 byly popsány 3 základní typy průmyslových robotů. Pro účel této bakalářské práce nejsou však vhodné všechny.

4DOF paletizační robot je pro tento účel nevhodný pro své omezené možnosti manipulovat s efektem. Znamenalo by to přístup efektoru k obrobku, uchyceného na pracovním stole, pouze shora. V takovém případě je limitující výška rámu (podrobněji popsaného v kapitole 3.1.3), která by zabráňovala obrábět kusy větších výšek. Robot typu SCARA není vhodný už kvůli své velikosti – efektor je větší, než je vhodné pro roboty těchto rozměrů.

3DOF DELTA by byl pro tento účel vhodnější, nevýhodou je však malý pracovní prostor, který by byl značně limitující pro velikost obrobků. Při volbě verze „dlouhé rameno“ by navíc došlo k přetížení robotu (informace převzaty z [15] - konkrétní model: IRB360). To z robotu DELTA dělá nevhodnou variantu.

6DOF je posledním typem robotu, který na rozdíl od předchozích variant splňuje všechny potřebné aspekty. Jeho nosnost je dostatečná, aby dokázal manipulovat s efektem a jeho pracovní prostor bude taktéž vyhovující.

2.3.3 Volba způsobu programování

Na základě srovnání v kapitole 2.2, byl zvolen způsob off-line programování, protože nabízí větší možnosti pro programování především tvarově složitých drah. On-line programování je při takovémto použití vhodné pouze pro základní tvary řezaných součástí, složitější tvary vyžadují off-line přístup.

3 NÁVRH EFEKTORU

Na trhu je k dostání nepřehledné množství řezaček EPS. Sortiment je velmi široký, od hrotových ručních řezaček, přes rámové řezačky (využívající odporového drátu) až po profesionální stroje pro velkoformátové řezy.

Téma této práce spadá do kategorie rámových řezaček s odporovým drátem, proto bude tato kategorie rozebrána podrobněji.



Obrázek 3.1: Komerční řezačky, běžně dostupné na trhu, ruční řezačka (1100mm) s pružinovým napínáním (vlevo), modelová řezačka (140mm) napínání přes zkrutnou pružinu na cívce (převzato z [16])

Komerční řezačky se vyrábějí v mnoha variantách a provedeních (příklady komerčních řezaček Obr.3.1). Všechny disponují rámem a odporovým drátem, dražší jsou vybaveny ještě dopínáním drátu pomocí předepnuté pružiny (většinou se jedná o řezačky s velkou efektivní délkou drátu, kde je protažení z důvodu ohřátí drátu značné – viz 3.1 vlevo). Všechny jsou ale určeny pro ruční použití, kdy je možné kontrolovat probíhající řez v reálném čase. Odpadá tak nutnost, mimo napájení ze sítě, zajišťovat ještě přívod stlačeného vzduchu pro vzduchově řízené dopínání a řídit tuto veličinu. Zatímco při použití průmyslového robotu, jakožto manipulátoru, s řezačkou není možné, nebo je spíše časově neefektivní, kontrolovat potřebné dopnutí drátu, případně během řezání mechanicky upravovat řezačku.

3.1 Koncepce efektoru

Konstrukce řezaček jsou rozdílné a vždy závisí na efektivní délce drátu a na účelu použití. Jak bylo řečeno výše, komerční řezačky využívají především pružinu, následujících několik odstavců bude věnováno různým konstrukcím a jejich výhodám a nevýhodám.

3.1.1 Bez napínání

U malých řezaček, kde je možné zanedbat protažení drátu vlivem teploty, případně je drát dopínán předpnutou konstrukcí, se může předpínací mechanismus vypustit. Toto řešení však není vhodné při robotizovaném zacházení s řezačkou, protože není možné sledovat a případně korigovat postup řezání v reálném čase.

3.1.2 Napínání pružinou

Konstrukce bez napínání však není příliš vhodná, jak se můžeme přesvědčit v práci „Vyřezávání plošných tvarů z polystyrenových desek pomocí průmyslového robotu“ od R. Dvořáka ([17]), kdy i na krátké vzdálenosti 100mm byla nepřesnost poměrně velká. Jak bylo řečeno již v úvodu kapitoly, u komerčních řezaček se běžně využívá napínání pomocí pružiny. Shrňme tedy klady a zápory tohoto využití:

- + snadnost použití
- + jednoduchost konstrukce
- + není potřebná další veličina (stlačený vzduch)
- nutnost vizuální kontroly řezu v reálném čase
- při využití automatizace nemožnost upravovat předpnutí pružiny

U komerčních řezaček (jak je možné vidět na obr. 3.1) lze takovýto způsob napínání nalézt celkem běžně, pro manuální použití má mnoho výhod, které jiné konstrukce nenabízí. U drtivé většiny je drát na jedné straně uchycen pevně a na straně druhé pak uchycen na pružinu, která drát napíná silou podle tuhosti pružiny.

3.1.3 Napínání pneumatickým válcem

Použití pneumatického pístu místo pružiny je sofistikovanější řešení problému tepelné dilatace, ale není vhodné pro všechna využití. Vhodné je například u automatizovaných řezaček složitých tvarů, kde se může měnit rychlost v různých částech řezu, například u rádiusů, nebo jiných složitých prvků. V takovém případě je tlak v pístu řízen příslušným automatickým systémem PLC¹, či jiným automatickým řízením. Odpadá tak nutnost regulování napnutí drátu uživatelem, což může být v mnoha případech užitečné.

Proto je toto řešení vhodné pro robotizované pracoviště, protože ve většině případů pracuje robot automatizovaně bez neustálé kontroly obsluhy. Z toho vyplývá, že neustálá vizuální kontrola obrobku není možná. Samozřejmostí je však správné nastavení PLC, zdroje napětí a rychlosti robotu, aby bylo řezání co nejefektivnější.

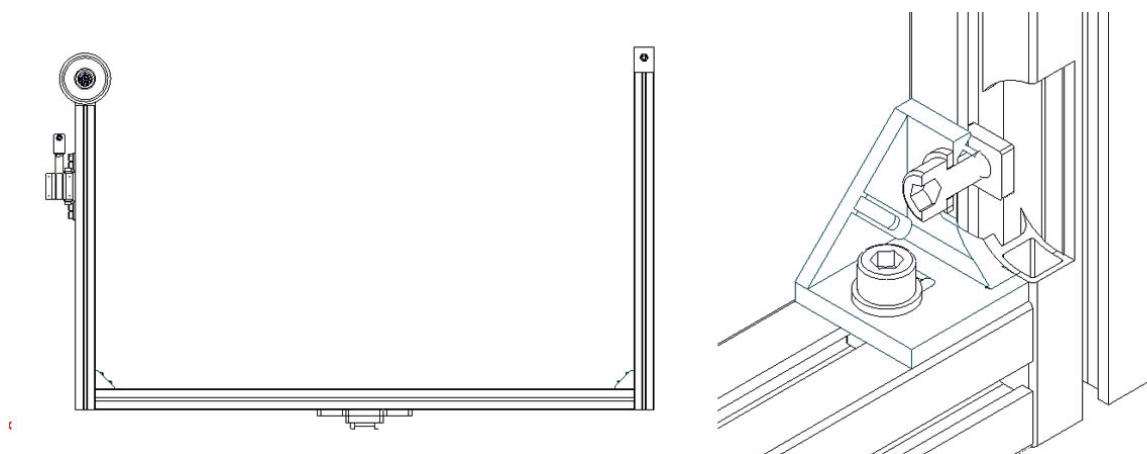
Popis konstrukce

Při konstrukci bylo z velké části vycházeno z práce R. Dvořáka [17], který se ve své práci zabýval podobným tématem. Jeho konstrukci však bylo nutné v některých částech upravit.

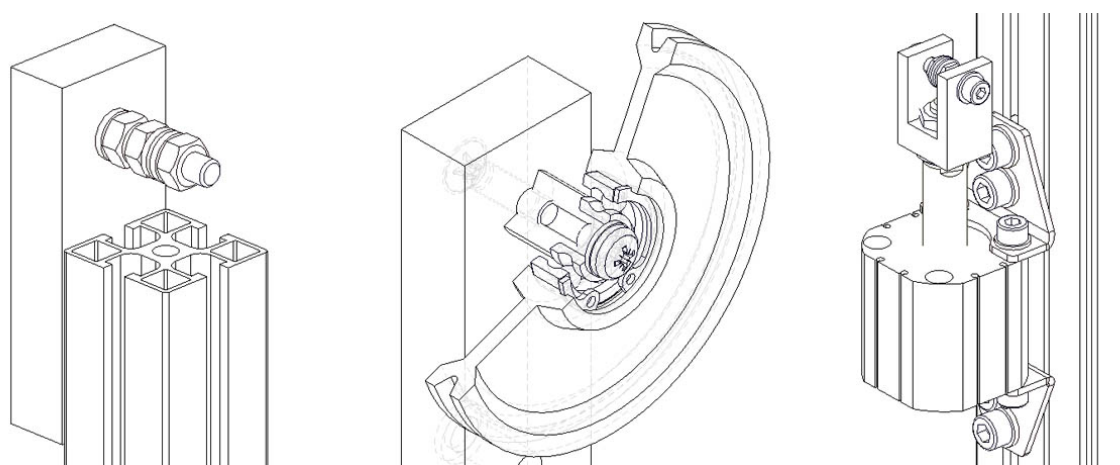
Pro rám byly zvoleny profily 30x30mm firmy Alutec K&K, a.s. [21], které se pomocí speciálních matek a úhelníků od stejného výrobce (úhelník a matice je vidět na obr. 3.2b), zkompletovaly do tvaru hranatého U. Celkový tvar je vidět na obrázku 3.2a. Rozměry byly předem stanoveny na 800x500mm a to především kvůli větší variabilitě (předchozí čtvercová konstrukce se neosvědčila, protože při řezání pod úhlem byla vnitřní vzdálenost ramen limitujícím faktorem).

Pro napínání drátu byla zvolena konstrukce pevný bod–kladka–píst, a to především kvůli úspoře místa. Na obrázku 3.3a je vyobrazen pevný bod pro připevnění odporového drátu, jakožto i jeho připojení ke zdroji elektřiny, protože „kostka“, do které je šroub

¹z anglického Programmable Logic Controller



Obrázek 3.2: a) Celkové schéma efektoru; b) Pohled na částečný řez úhelníkem.



Obrázek 3.3: a) Pevný bod pro uchycení drátu; b) Částečný řez kladkou pro zvýraznění konstrukčních prvků; c) Uchycení pístu na profil je realizováno plechem ohnutým do tvaru „L“.

přípevněn, je z plastu, tzn. izolující od konstrukce efektoru a robotu.

Obdobně je řešeno uchycení kladky. Na obrázku 3.3b je vidět hřídel, uchycená pomocí šroubu do hřídelky nesoucí ložisko zajištěné šroubem s podložkou. Kladka je proti axiálním silám zajištěna vnitřním pojistným kroužkem. Ona samotná je vyrobena z PTFE², který je vhodný pro práci za teplot od -200°C do +260°C. [19]

Na konci je drát uchycen do kostičky tvaru hranatého „U“ (taktéž z plastu kvůli izolaci) na pístu, kam je přiveden druhý drát elektrického zdroje. Tato kostička zároveň plní funkci klíče, pro dotažení matice na pístnici pneumatického válce.

Pneumatický válec byl zvolen CD55B25-25M od firmy SMC, parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tento válec byl zvolen především díky jeho variabilitě a jednoduchému připojení k rámu pomocí dvou plechů ohnutých do tvaru „L“, které jsou částečně vidět na obr. 3.3c. Pro uchycení byly použity šrouby M5 (do pístu) a M6 (do rámu).

Píst byl volen podle pracovní délky na základě předběžného výpočtu podle fyzikálních vlastností kanthalu (soustava tabulek 3.2; 3.3; 3.4).

²Polytetrafluoretylen - běžně nazývaný „teflon“

Φ pístu	Zdvih válce	Max. provozní tlak	Min. provozní tlak	Střední rychlost pístu
25mm	25mm	1,0MPa	0,05MPa	50–500mm/s

Tabulka 3.1: Tabulka základních parametrů pneumatického válce CD55B25-25M (převzato z [20])

Teplota při řezání se pohybuje v rozmezí 150-250°C (423,15-523,15K). Pomocí koeficientu prodloužení α z tabulky 3.4 lze určit o kolik se drát prodlouží vlivem teploty. Díky tomu můžeme určit vhodnost pneumatického válce.

Minimální hodnota prodloužení - při 150°C (423,15K)

$$\Delta l = l_c \cdot \alpha \cdot T = 950 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 423,15 = 4,4219mm \quad (3.1)$$

Maximální hodnota prodloužení - při 250°C (523,15K)

$$\Delta l = l_c \cdot \alpha \cdot T = 950 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 523,15 = 5,4669mm \quad (3.2)$$

Z rovnic (3.1) a (3.2) vyplývá, že zdvih zvoleného válce (25mm podle tabulky 3.1) je pro vymezení dilatace drátu dostatečný a proto je vhodný pro naše účely.

Mez kluzu ($R_{p0.2}$)	Pevnost v tahu (R_m)	Tažnost (A)	Tvrdost	Elektrický odpor (při 20°C)
550 MPa	750 MPa	16 %	230 Hv	1,23 $\Omega mm^2/m$

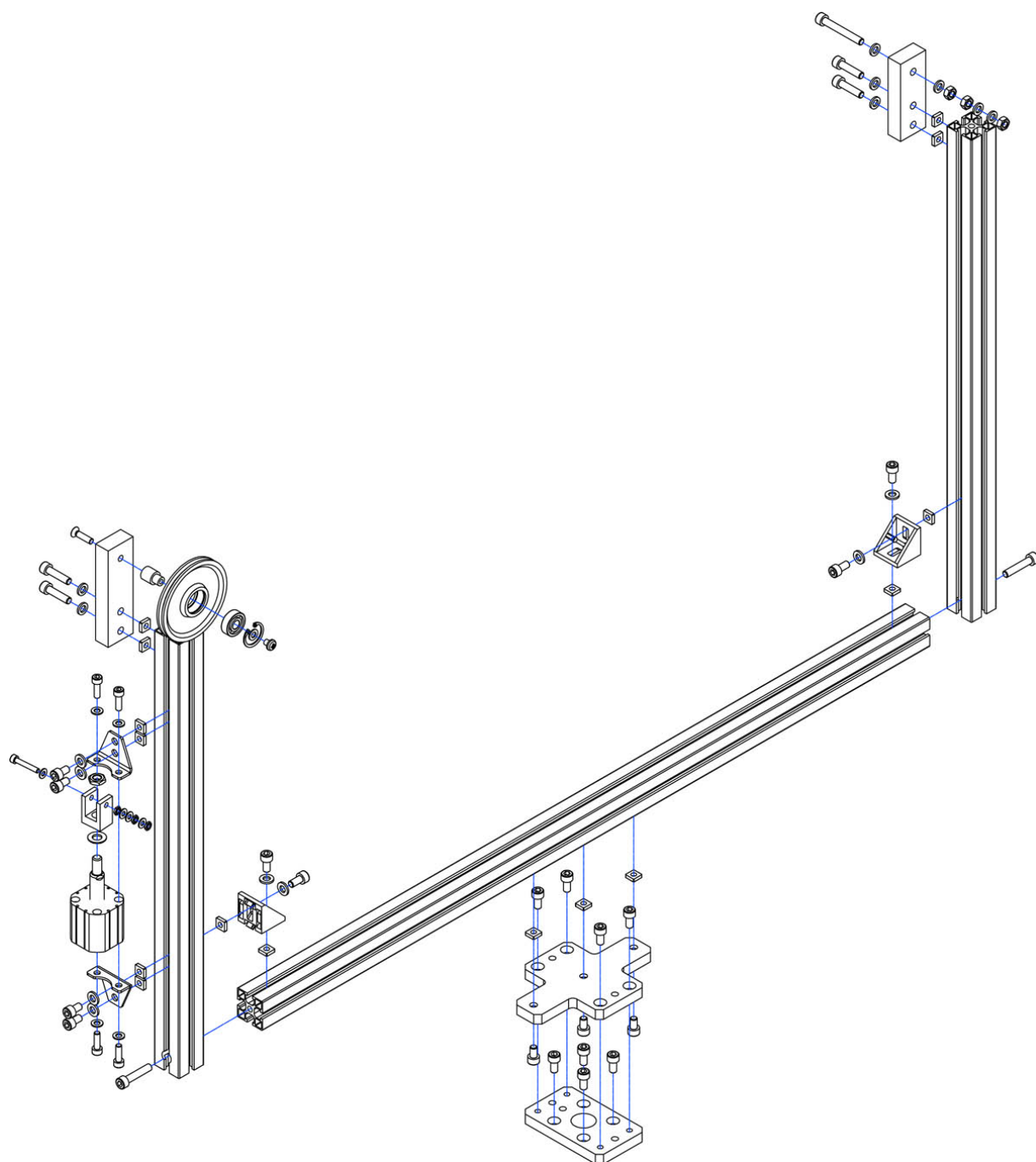
Tabulka 3.2: Základní fyzikální vlastnosti kanthalu pro drát $\phi 1mm$. (Převzato z [22])

Teplota [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Odporový faktor	1,00	1,02	1,03	1,04	1,05	1,08	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12

Tabulka 3.3: Faktor el. odporu v závislosti na teplotě pro drát $\phi 1mm$. (Převzato z [22])

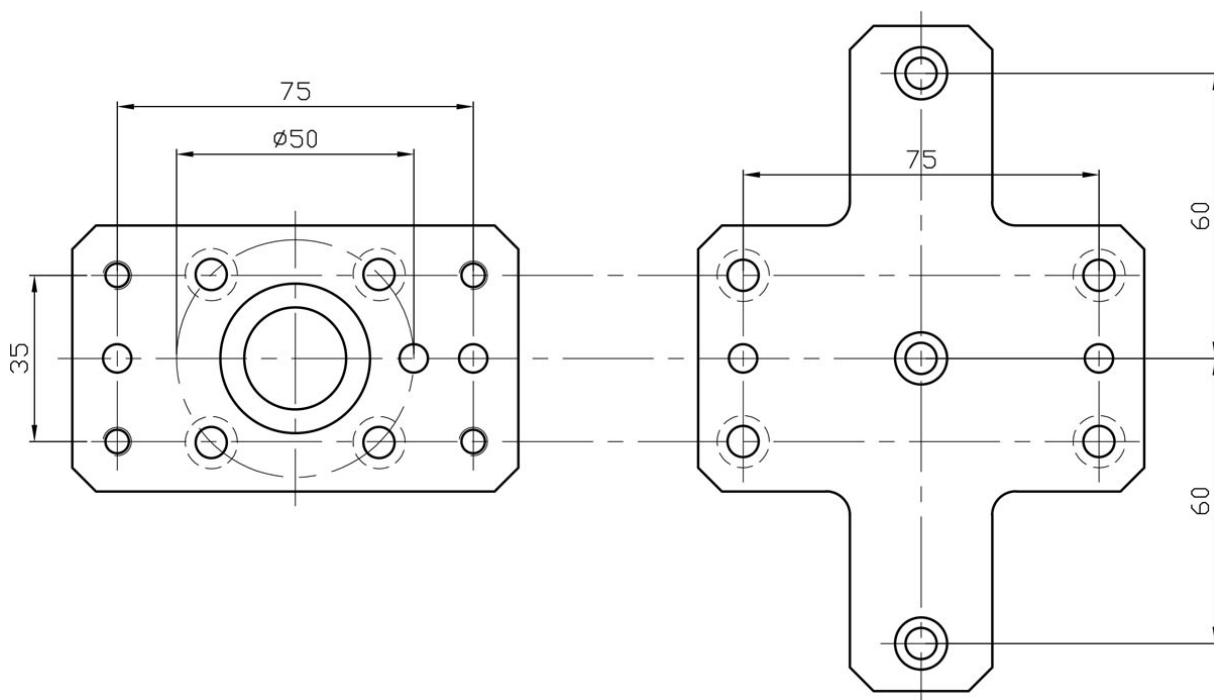
Teplota [°C]	20–250	250–500	500–750	750–1000
$\alpha [X \cdot 10^{-6}/K]$	11	12	14	15

Tabulka 3.4: Tabulka tepelné roztažnosti α pro drát $\phi 1mm$. (Převzato z [22])



Obrázek 3.4: Rozpad sestavy efektoru pro snazší kompletaci.

Obrázek 3.4 slouží pro přehlednou montáž jednotlivých dílů na správné místo. Lze na něm také vidět dělenou přírubu, kterou bylo nutné zvolit kvůli kolizi profilu a šroubů pro uchycení na přírubu robotu. Příruba je zobrazena na obrázku 3.5a, kde jsou vidět 4 díry pro šrouby M6 na roztečné kružnici $\Phi 50\text{mm}$ a díra pro středící kolík pro připojení na robot. Tato část příruby se připojuje na robot jako první a na ni se připojuje část druhá, která je vyobrazena na obrázku 3.5b. Připojovací rozměry k první přírubě jsou opět pomocí 4 šroubů M6, které jsou umístěny v rozích tak, aby nepřekážely profilům rámu. Součástí jsou i středící kolíky. Tato příruba se přes 3 šrouby M6 s roztečí 60mm uchyť k rámu efektoru. Díky takto řešené přírubě je montáž a demontáž efektoru na robot snadnou a rychlou operací.



Obrázek 3.5: Dvě části příruby. a)část příruby na robot, b)mezi-příruba na efektor.

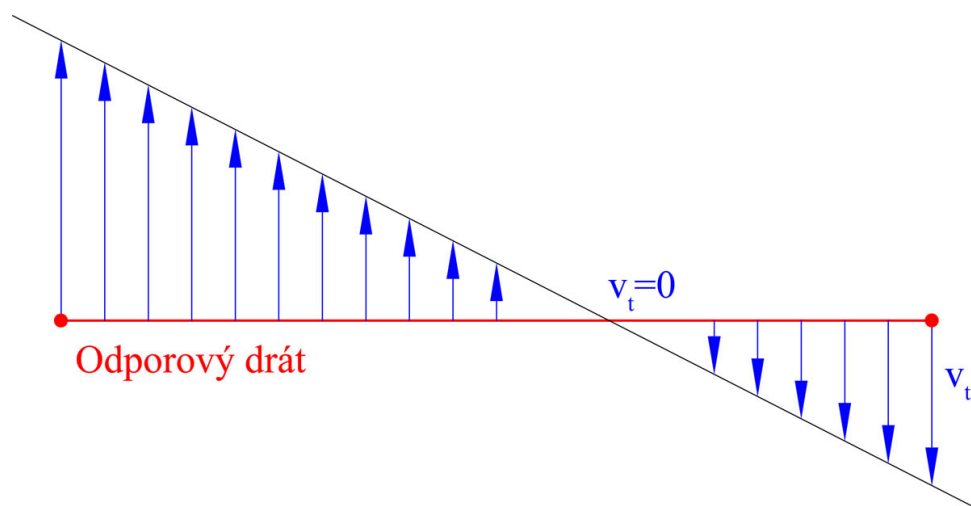
Možnosti řízení napínání drátu

Řízení napínání pomocí pneumatického válce přináší několik možností, jak řídit napnutí drátu. Nejjednodušší variantou je napnutí konstantním tlakem. Další možností je řízení tlaku podle informací z robotu. Nejsofistikovanější a zároveň nejobtížnější metodou je řízení tlaku a teploty na základě informací z robotu. Tyto možnosti budou probrány podrobněji v následujících kapitolách.

Konstantní tlak je vhodný pro jednoduché trajektorie. Jedná se fakticky o sofistikovanější pružinu, které lze kdykoli (i za běhu robotu) změnit tuhost změnou tlaku. Při tomto řešení není nutné programovat PLC a řídit tak tlak v pístu, stačí pouze nastavit konstantní tlak pomocí ventilu a tak předpnout drát i rám, čímž se vymezí teplotní dilatace a částečně i deformace rámu způsobená působením síly od řezaného materiálu při pohybu robotu.

Tlak řízený na základě informací z robotu je složitější metodou řízení. Složitější kvůli nutnosti programování PLC a získávání informací o rychlosti robotu, což není zdaleka

jednoduchým úkolem. Jedná se však o efektivnější metodu. Odporový drát není předpnutý stále stejnou silou, když je efektor v klidu a není v záběru, tlak je minimální - pouze pro vymezení teplotní dilatace. Pokud je však efektor v záběru, tlak se mění podle rychlosti efektoru. To znamená, že je drát vždy vypnutý pouze na potřebnou úroveň. Nedostatek tohoto řešení je možné nalézt u tvarově komplikovaných dílů. Ne vždy je totiž tečná rychlost na drátu všude stejná.



Obrázek 3.6: Schématické znázornění tečné rychlosti efektoru při rotaci kolem bodu umístěného mezi rameny efektoru.

Na schématu 3.6 je znázorněn případ, kdy bod otáčení leží mezi rameny efektoru. Jinými slovy, v těchto místech (kde $v_t=0$) se efektor nepohybuje. Pokud by byl zvolený referenční bod, pro výpočet rychlosti, střed odporového drátu, došlo by k jisté chybě, kterou však nelze obecně určit.

Řízení tlaku a teploty na rychlosti je pravděpodobně nejkomplexnější a zároveň nejnáročnější způsob řízení, protože při řezání dochází k masivnímu ochlazování drátu v závislosti na rychlosti řezání, ale také na délce drátu v záběru. Jelikož tuto délku není možné obecně určit, nabízí se řízení na rychlosti robotu, nebo teoretickém bodě efektoru. Toto řízení bylo popsáno v předchozí kapitole, proč je tedy potřebné řídit i výkon zdroje? Tato otázka byla vysvětlena již výše — je to již zmíněné ochlazování drátu během řezání. Za předpokladu konstantní délky drátu v záběru bude rychlost ochlazování drátu závislá na rychlosti posuvu. Z toho vyplývá, že čím vyšší je rychlost posuvu, tím více je nutné žhavit drát. Z toho ale plyne nutnost použít stabilizovaný zdroj s možností automatického řízení proudu a napětí. Takový zdroj není levnou záležitostí a spolu s obtížným zjištěním rychlosti na efektoru staví tuto metodu jako nejobtížnější a nejnákladnější. Vystává tedy otázka, zda-li by se tato metoda v praxi vůbec vyplatila. Odpověď není až tak snadná. Pravděpodobně by bylo nutné postavit tuto metodu vůči ostatním v přímém testu. To však v současných podmínkách není možné, nebudeme se tedy touto metodou zabývat.

4 PRACOVISTĚ

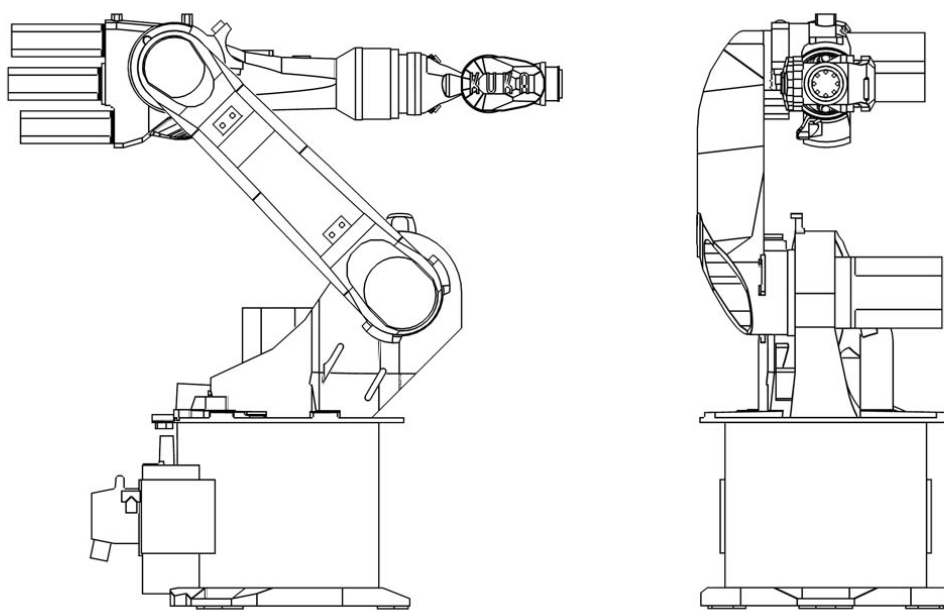
Protože se jedná pouze o experimentální prototyp, nebudeme uvažovat oplocení ani jiné bezpečnostní prvky. Zaměříme se pouze na samotný robot, efektor a součásti nutné k provozu.

4.1 Hlavní použité komponenty

Hlavními použitými částmi jsou robot, efektor, stabilizovaný laboratorní zdroj el. energie a zdroj stlačeného vzduchu.

4.1.1 Robot

V kapitole 2.1 byly popsány nejrozšířenější typy robotů a v kapitole 2.3.2 byl pak zvolený 6DOF robot, jež pro účely této práce vyhovuje nejvíce. Vzhledem k dostupným robotům byl následně zvolen robot Kuka KR 16-2. Jedná se o všestranný robot vhodný pro nízké hmotnosti efektoru (do 16kg). Tohoto robota jsme zvolili především kvůli velikosti efektoru.



Obrázek 4.1: Schéma robotu Kuka KR16. a) pohled z boku; b) pohled zepředu (model robotu převzat z [14])

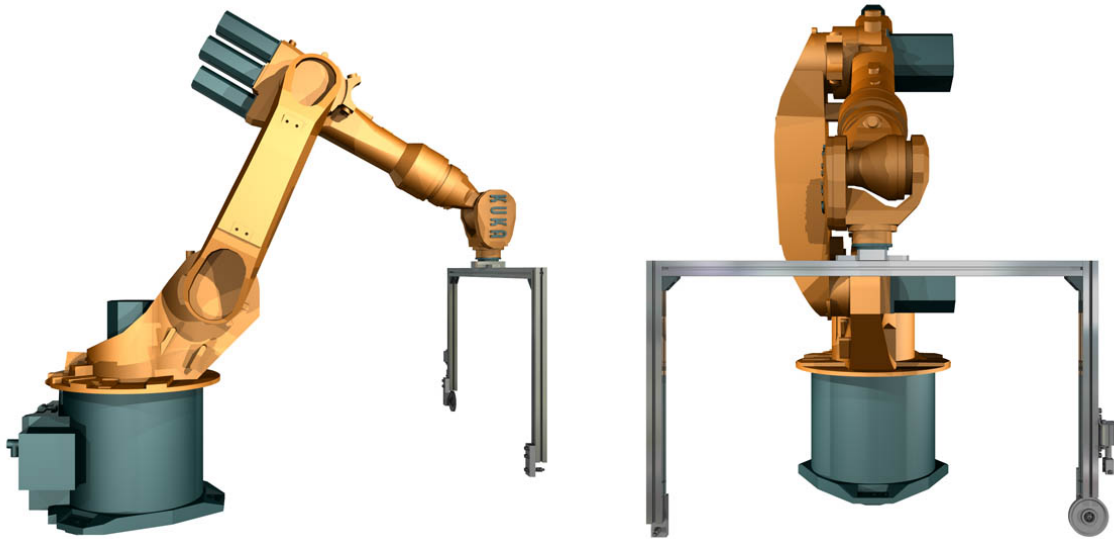
Maximální dosah robotu činí 1610mm, nosnost je zmíněných 16kg, opakovatelnost¹ $\leq \pm 0,05\text{mm}$. Tyto vlastnosti jej dělají vhodným pro použití pro účely této práce.

¹Jednotka přesnosti průmyslových robotů. Udává odchylku od přesného teoretického bodu k poloze do které je robot schopen opakovaně najet. Další technické parametry stanovuje norma ČSN EN ISO 9283.

4.1.2 Efektor

Konstrukce efektoru již byla popsána v kapitole 3.1.3. Byl použit kanthalový drát o průměrech 0,8 a 0,65mm. Pro jeho žhavení byl dále použit stabilizovaný zdroj. Pro pohon pístu jsme použili kompresor, jehož tlak byl upraven pomocí tlakového ventilu.

4.2 Sestava



Obrázek 4.2: CAD model sestavy s robotem a uchyceným efektem

Pro experimentální měření bylo využito laboratorního zdroje firmy Diametral (viz. tabulka 4.1), díky kterému bylo možné změřit závislost napětí a proudu na teplotě.

Typ: P230R51D
V.Č.: 1800
Napájení: 230V / 50Hz
Příkon: 320W
Maximální výstup 2x 30V / 4A; 1x 5V / 3A

Tabulka 4.1: Tabulka základních vlastností stabilizovaného laboratorního zdroje Diametral

Jako zdroj stlačeného vzduchu byl použit kompresor Silent Master 50-8-9 W, který dodával tlak 0,8MPa. Vzduch byl následně upraven na rozmezí tlaků 0,3–0,5MPa. Během měření se značnou měrou projevil tzv. Slip-stick efekt. Tento efekt se projevuje při malých rychlostech a malých změnách sil. Je způsoben rozdílným součinitelem tření statickým a dynamickým, přičemž statický je zpravidla větší. Vlivem tohoto efektu dochází k trhavému pohybu válce nahoru nebo dolů, zatímco tlak je regulován plynule.

4.3 Výsledky

4.3.1 Teplotní dilatace

Ač byla teplotní dilatace spočítána v kapitole 3.1.3 z důvodu volby pneumatického válce, součinitel α je určený pouze pro vybrané průměry drátů a délky protažení se tedy mohou lišit v závislosti na průměru a druhu drátu. Proto bylo provedeno kontrolní měření, pro zpětnou kontrolu tohoto součinitele.

Měření bylo provedeno přímo na efektoru, který byl (pomocí dalšího profilu) vyztužen proti nežádoucí deformaci – touto dočasnou úpravou vznikla dostatečně tuhá konstrukce pro určení teplotního prodloužení. Rozdíly délek byly měřeny za tlaku 0,2MPa a 0,3MPa (měření za tlaku 0,3MPa bylo provedeno pouze v některých hodnotách, protože toto měření bylo pouze kontrolní a sloužilo pro eliminaci odchylky při měření). Velikost prodloužení byla odečítána podle vysunutí válce. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Napětí [V]	2,7	3,6	4,5	5,5	6,4	7,2	8,2	9,1
Proud [A]	2,0	0,60	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8
Výkon [W]	1,62	2,88	4,50	6,6	8,96	11,52	14,76	18,20
Prodloužení při 0,2MPa [mm]	0,0	0,3	0,4	0,4	0,5	1,0	1,2	1,3
Prodloužení při 0,3MPa [mm]	0,0	0,1	/	0,3	/	0,8	/	1,3
Napětí [V]	10,0	10,9	11,9	12,8	14,7	16,6	18,0	/
Proud [A]	2,2	2,4	2,6	2,8	3,2	3,6	3,91	/
Výkon [W]	22,00	26,16	30,94	35,84	47,04	59,76	70,38	/
Prodloužení při 0,2MPa [mm]	1,5	1,8	2,2	2,5	3,5	4,1	4,5	/
Prodloužení při 0,3MPa [mm]	/	1,8	/	2,5	3,3	3,9	4,3	/

Tabulka 4.2: Tabulka naměřených dilatací drátu Kanthal $\Phi 0,68\text{mm}$

Do grafu 4.3 byly vyneseny hodnoty prodloužení. Tyto hodnoty byly následně proloženy aproximační přímkou.

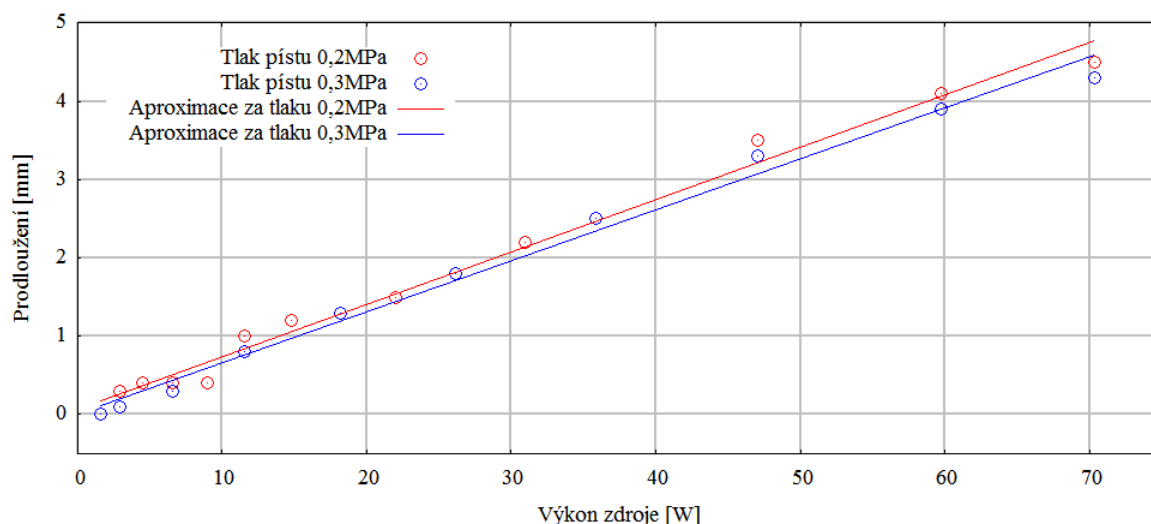
Rovnice aproximační přímky za tlaku 0,2MPa

$$y = 0,0668 \cdot x + 0,0717 \quad (4.1)$$

Rovnice aproximační přímky za tlaku 0,3MPa

$$y = 0,0651 \cdot x + 0,0081 \quad (4.2)$$

Z rovnic přímek ((4.1) a (4.2)) lze snadno určit koeficient teplotní roztažnosti v závislosti na výkonu zdroje. Protože se od sebe směrnice jednotlivých aproximačních přímek výrazně neliší, pro jejich sjednocení použijeme aritmetický průměr.



Obrázek 4.3: Graf závislosti prodloužení drátu na výkonu zdroje.

Aritmetický průměr směrnice

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{0,0668 + 0,0651}{2} = 0,06595 \quad (4.3)$$

Výpočet součinitele ϵ

$$\epsilon = \frac{\bar{k}}{l_c} = \frac{0,06595}{950} = 7,0316 \cdot 10^{-5} \frac{1}{W} \quad (4.4)$$

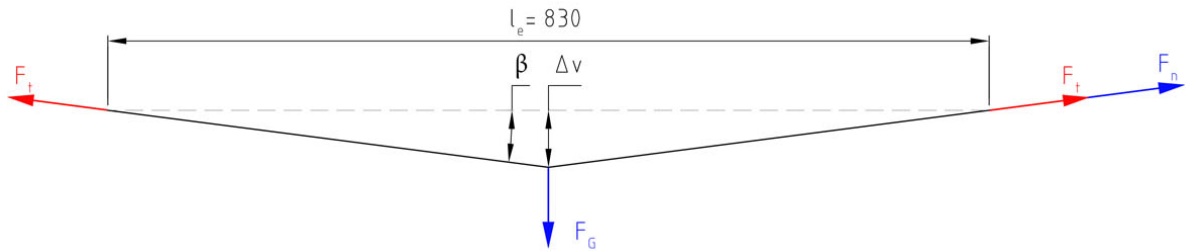
Součinitel teplotní dilatace bývá obvykle označován α , v našem případě však součinitel není závislý na teplotě, ale na výkonu zdroje, označíme jej tedy ϵ . Tato hodnota součinitele (z rovnice (4.4)) byla stanovena pro drát Kanthal $\phi 0,65\text{mm}$, jehož odpor je $R = 4,20\Omega/m$. Pro jiný drát by tato hodnota byla odlišná.

Je nutné si uvědomit, že tato hodnota je jistou měrou ovlivněna deformací drátu, především výrazně se zde projevuje creep², který se projevil především za tlaku 0,3MPa, kdy se drát trvale protáhl o 12,9mm. Po tomto protažení došlo k částečnému deformačnímu zpevnění, což se projevilo na dalších testech snížením plastické deformace.

²Creep — označuje „tečení“ materiálu způsobené působením síly za zvýšených teplot

4.3.2 Teoretická přesnost

Teoretická přesnost byla měřena simulováním síly působící na drát. Schéma zatížení včetně sil a rozměrů je na obrázku 4.4. Působením síly F_G vzniká na drátu průhyb od výchozí polohy, čímž vzniká úhel β . Drát byl zatížen uprostřed mezi rameny závažím o váze 1,111kg, jež vytváří sílu $F_G=10,899\text{N}$. Zatížení bylo po celou dobu měření konstantní a regulované veličiny byli napínací síla (F_n ; vyvolaná pístem) a výkon zdroje (P), každé měření probíhalo samostatně.

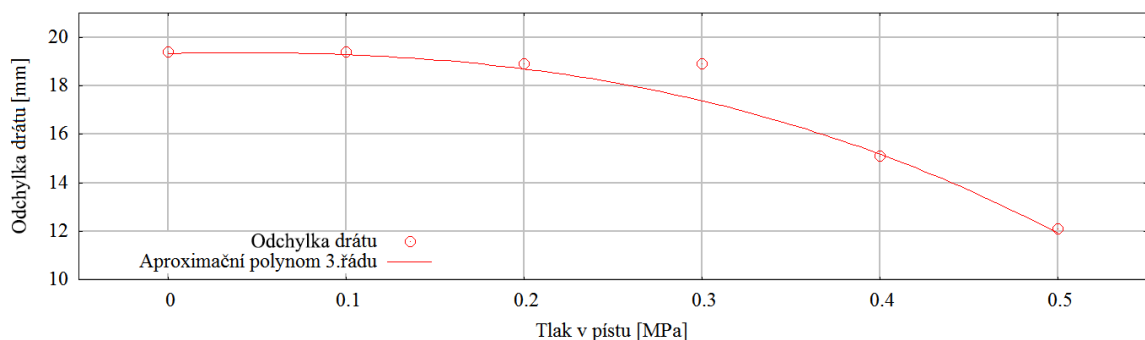


Obrázek 4.4: Schéma měření odchyly drátu s naznačenými rozměry a působícími silami

Odchylka při proměnném tlaku – Měření probíhalo bez napájení (tzn. za studena), hodnoty odchyly jsou vyneseny v tabulce 4.3. Z odchyly byl určen úhel β (rovnice (4.5)) a následně tahová síla (F_t ; rovnice (4.7)) a sečtením s napínací silou (F_n ; rovnice (4.6)) vyšla síla celková (F_c ; rovnice (4.8)) působící na drát.

Tlak v pístu – p [MPa]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Odchylka – Δv [mm]	19,4	19,4	18,9	18,9	15,1	12,1
β [°]	2,68	2,68	2,61	2,61	2,08	1,67
Napínací síla – F_n [N]	0,00	37,78	75,56	113,33	151,11	188,89
Tahová síla – F_t [N]	116,72	116,72	119,80	119,80	149,89	187,01
Celková síla – F_c [N]	233,43	271,21	315,15	352,93	450,89	562,90

Tabulka 4.3: Tabulka naměřených odchylek drátu Δv a vypočítaných hodnot β (podle vztahu (4.5)), F_t (podle vztahu (4.7)), F_n (podle vztahu (4.6)) a F_c (podle vztahu (4.8)).



Obrázek 4.5: Graf hodnot odchyly drátu od výchozí polohy pod zatížením v závislosti na tlaku pístu proložený aproximační křivkou

Vztah pro výpočet hodnoty β

$$\tan\beta = \frac{\Delta v}{l_e} \Rightarrow \beta = \arctan \frac{\Delta v}{l_e} \quad (4.5)$$

Vztah pro výpočet hodnoty napínací síly F_n

$$F_n = p \cdot S = p \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = p \cdot \pi \cdot \frac{D^2 - d^2}{4} \quad (4.6)$$

Vztah pro výpočet hodnoty tahové síly F_t

$$F_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_G}{\sin \beta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot g}{\sin \beta} \quad (4.7)$$

Vztah pro výpočet hodnoty celkové síly F_c

$$F_c = 2 \cdot F_t + F_n \quad (4.8)$$

Aproximační polynom 3. řádu z grafu 4.5

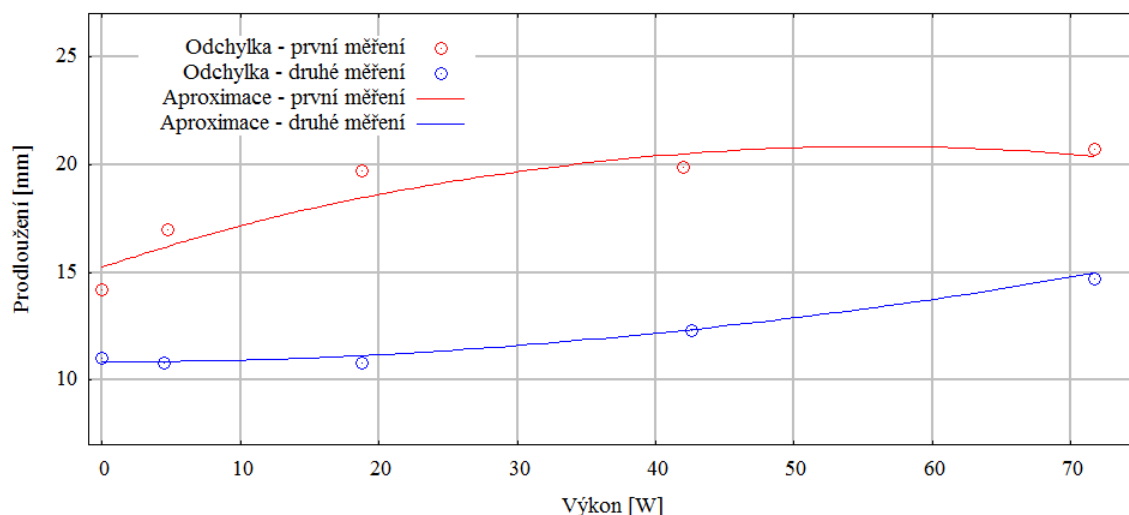
$$y = -59,259 \cdot x^3 - 5,9127 \cdot x^2 + 2,9458 \cdot x + 19,328 \quad (4.9)$$

Tento experiment je pouze orientační. Reálné síly působící na drát během řezání nejsou v žádném případě konstantní, stále se mění v závislosti na rychlosti, efektivní délce řezu a teplotě drátu. Pomocí tohoto experimentu bylo zjištěno, že i za působení poměrně velké síly, která v praxi pravděpodobně nenastane, je efektor schopen do jisté míry eliminovat odchylku (Δv) změnou tlaku ve válci. Dále bylo zjištěno maximální napětí pro spolehlivé řezání, při tlaku 0,6MPa totiž došlo k přetržení drátu, bezpečné hodnoty se tedy pohybují pod tímto tlakem – doporučený tlak je 0,2–0,3MPa. Tento tlak je dostatečný pro vymezení teplotní dilatace a také pro zachycení malých sil vznikajících při rychlém řezání, kdy žhavení drátu není dostatečně rychlé.

Odchylka při změně výkonu – Měření probíhalo opět za konstantního zatížení (1,111kg) a konstantního tlaku napínání ($p = 0,3MPa$), proměnnou veličinou byl v tomto případě výkon zdroje. Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky 4.4, důležité hodnoty pak byly zaneseny do grafu 4.6, ve kterém je zřetelně vidět deformační zpevnění, které bylo již zmíněno v kapitole 4.3.1.

	První měření					Druhé měření				
Napětí [V]	0	4,7	9,4	14	18,4	0	4,5	9,4	14,2	18,4
Proud [A]	0	1	2	3	3,9	0	1	2	3	3,9
Výkon [W]	0	4,7	18,8	42	71,76	0	4,5	18,8	42,6	71,76
Odchylka [mm]	14,2	17	19,7	19,9	20,7	11	10,8	10,8	12,3	14,7

Tabulka 4.4: Tabulka hodnot odchylky drátu od výchozí polohy za konstantního zatížení a tlaku v pístu s proměnným výkonem zdroje.



Obrázek 4.6: Graf závislosti odchylky drátu na výkonu zdroje

Aproximační polynom 2. řádu pro první měření z grafu 4.6

$$y = -0,0021 \cdot x^2 + 0,2227 \cdot x + 15,242 \quad (4.10)$$

Aproximační polynom 2. řádu pro druhé měření z grafu 4.6

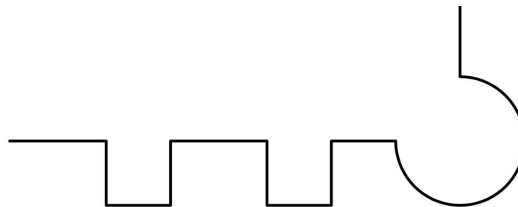
$$y = 0,0009 \cdot x^2 - 0,0075 \cdot x + 10,865 \quad (4.11)$$

Jak je názorně vidět na grafu 4.6, během prvního měření bylo prodloužení drátu a tudíž i odchylka značně velká, po ochlazení drátu byl drát dotažen, čímž byla vymezena plastická deformace způsobená creepem. Plastická deformace vzniklá za prvního měření dosahovala hodnoty 12,9mm. Během druhého měření již k takové deformaci nedošlo, ač bylo provedeno se stejným zatížením i tlakem, plastická deformace dosáhla hodnoty 2,1mm. Je tedy evidentní, že drát prošel určitým deformačním zpevněním. Plastické deformace však stále pokračují a stále drát degradují až do bodu, kdy se drát přetrhne. Tento bod lze oddálit snížením napínací síly (doporučené hodnoty se pohybují, jak již bylo řečeno výše, mezi 0,2–0,3MPa), ale především snížením síly působící na drát (ideálně tuto sílu úplně eliminovat). Toho lze dosáhnout snížením rychlosti pohybu robotu na takovou hodnotu, aby řezání probíhalo pouze tavením polystyrenu.

Jak je vidět tato problematika je značně komplikovaná a určení rychlosti robotu obecně, nebo teoreticky je takřka nemožné. Zjištění maximálních rychlostí lze dosáhnout pravděpodobně pouze empiricky.

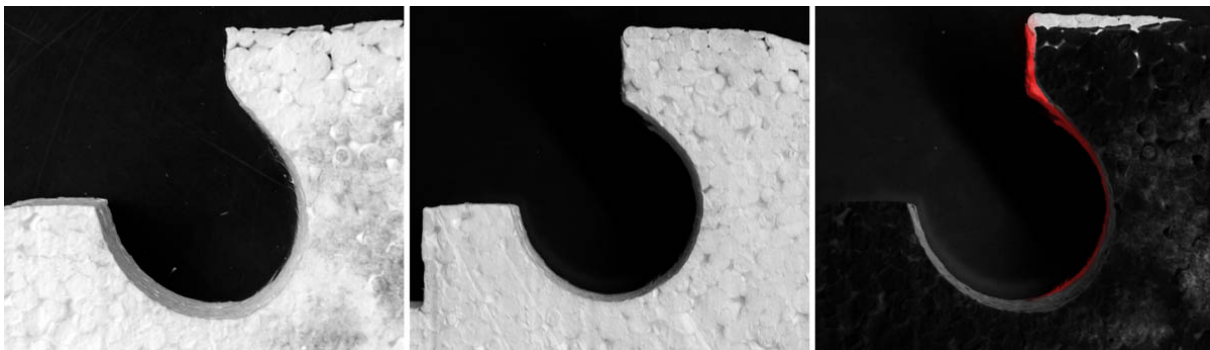
4.3.3 Řezání robotem

Z technických důvodů nebylo možné využít původně zamýšlený robot KUKA KR 16. Z tohoto důvodu bylo rovněž upuštěno od využití a vytvoření simulačního modelu v CAD/CAM systému. Pro ověření funkce efektoru byl sestaven program pro robot KUKA KR 3 na základě absolutních souřadnic s využitím relativních pohybů. Na základě zjištěných experimentálních dat však lze praktické ověření považovat za zcela dostatečné. První měření bylo uskutečněno bez napínání drátu. Laboratorní zdroj byl nastaven na hodnoty napětí $U = 18,0V$ a proudu $I = 3,91A$, což odpovídá výkonu $P = 70,38W$. Tímto výkonem bylo dosaženo teploty drátu $235^{\circ}C$ (změřeno pomocí multimetru UNI-T, model UT58E, seriového čísla 810004947). Druhé měření bylo provedeno za stejných hodnot zdroje, tlak ve válci byl však nastaven na $p = 0,3MPa$. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při omezení rychlosti na $66mm/s^{-1}$. Experimentální dráha byla pro obě měření totožná, obsahovala (jak je vidět na obrázku 4.7) lineární (přímé) i cirkulární (kruhové) části trajektorie.



Obrázek 4.7: Experimentální dráha řezání.

Porovnáním výsledků mezi sebou bylo zjištěno, že rozdíl na lineární části dráhy je takřka nulový. To je pravděpodobně způsobeno proměnnou rychlostí robotu při jeho pohybu. Při dojíždění na zadané souřadnice robot snižuje rychlost plynule, do úplného zastavení, což dává čas nedokonalé předpnutému drátu se dotáhnout na výchozí pozici. Během řezání kruhového tvaru je však rychlost tečná na dráhu konstantní a pokud je drát vychýlen z výchozí polohy (kterou uvažuje robot) vzniká nepřesnost „dobíháním“ drátu. Síla působící na drát (vznikající neustálým pohybem) v takovém případě není tečná na naprogramovanou dráhu. Tato nepřesnost se projevila při řezání bez napínání, jak je vidět na obrázku 4.8a. Během řezání s napínáním byla tato nepřesnost eliminována, výsledek je zřetelný na obrázku 4.8b. Na obrázku 4.8c je možné vidět srovnání obou řezů, přičemž červená barva označuje vzniklou nepřesnost.



Obrázek 4.8: Porovnání řezu a) bez napínání; b) s napínáním pomocí válce za tlaku $0,3MPa$; c) srovnání řezů – červeně označená difference

Odchylka výsledné velikosti od naprogramované je rovna dvojnásobku průměru drátu (v případě drátu $\Phi 0,65mm$ je nepřesnost rovna $1,3mm$). To je způsobeno vyzařováním tepla drátem a natavování polystyrenu v okolí.

Během řezání se však projevila deformace rámu způsobená jeho nedostatečnou tuhostí. Tato deformace byla zapříčiněna napínací silou vyvíjenou pneumatickým válcem. Ačkoliv toto chování nebylo předpokládáno a na první pohled se jeví jako nežádoucí, na výsledek řezání se to nijak neprojevilo. Deformace činila na koncích rámu výchylku o maximální hodnotě 15mm. Tato deformace vytvořila z rámu pružinu, která eliminovala normálové síly působící na drát, přičemž pneumatický válec sloužil jako tlumič a pojistný prvek, který by se při překročení tahové síly vysunul a zamezil tak přetržení drátu. Takovéto chování je však nežádoucí, proto je nutná správná regulace rychlosti robotu.

ZÁVĚR

Cíle této práce byly splněny. Byla navržena technologie pro řezání tvarových objektů z polystyrenu a byl navržen vhodný způsob napínání odporového drátu pro řezání prostřednictvím pneumatického válce, což výrazně zvýšilo přesnost řezu.

Celá technologie byla prakticky ověřena a bylo zjištěno relativně velké množství experimentálních dat, které jsou podrobněji popsány v kapitole 4.3.

Navržená koncepce napínání drátu je dostatečná, nicméně zvolený pneumatický válec vykazuje značný slip-stick efekt, což způsobuje „zaseknutí válce“ na jedné poloze i při změně tlaku (způsobují to malé rychlosti a krátké trajektorie posuvu pístu). Bylo by tedy vhodné zvolit jiný pneumatický válec, který bude mít nižší slip-stick efekt, nebo jinak vyřešit upevnění drátu na píst. Vhodná by byla například kladka, která by dráhu a rychlost pístu zvýšila na dvojnásobek. Jak je dále uvedeno v závěru kapitoly 4.3, napnutím drátu došlo k výrazné deformaci a předpnutí rámu, ačkoliv je tato deformace pouze elastická a nemá žádný vliv na funkčnost. Tím je napínací síla od pneumatického válce částečně degradována. Bylo by tedy vhodné rám vyztužit, aby se deformace snížila.

V kapitole 4.3.1 bylo řečeno, že není příliš vhodné namáhat drát příliš vysokou silou. Za zvýšené teploty se výrazně projevuje creep, který způsobuje značné plastické deformace drátu. Prvotní deformace je značná, ale i když se postupně postup deformace snižuje, nezastaví se úplně. Po překročení určité hodnoty drát může nečekaně prasknout. Proto je vhodné dodržovat maximální hodnotu tlaku stanovenou na 0,3MPa (vhodnější je však tlak 0,2MPa, který stačí pro vymezení dilatace, ale nezpůsobuje takové protažení drátu). Řezání probíhalo za teploty 235°C, která byla dostatečná pro řezání. Pokud by bylo nutné zvýšit rychlost, bylo by nezbytné také zvýšit teplotu řezání, to by ale znamenalo změnu materiálu kladky – jak bylo řečeno v kapitole 3.1.3, teflon je vhodný pro použití do 260 °C. Při vyšších teplotách by mohlo dojít k natavení kladky nebo k úplnému roztavení.

LITERATURA

- [1] Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS): Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci. SDRUŽENÍ EPS ČR. *Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS): Pěnový polystyren pro tepelnou a zvukovou izolaci* [online]. 13.4.2012 [cit. 2013-03-09].
Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>
- [2] Zateplování a izolace – extrudovaný polystyren. *Bydlení pro každého: vše o bydlení stavbě a zahradě* [online]. 27.02.2012 [cit. 2013-03-28].
Dostupné z: <http://www.bydleniprokazdeho.cz/zateplovani-a-izolace-extrudovany-polystyren.php>
- [3] EPS ČR. EPS: Sdružení EPS ČR [online]. ©2010 [cit. 2013-03-15].
Dostupné z: <http://www.epscr.cz>
- [4] Řezání a opracování EPS, EPP, XPS. ŠTĚPINA, Pavel. *Monach: RC modelářský nadšenec z Chlístovic* [online]. 30.6.2012 [cit. 2013-04-04].
Dostupné z: <http://www.monach.cz/clanky/rezanipolystyrenu.htm>
- [5] BACHL, spol. s r.o. BACHL, spol. s r.o. [online]. ©2005 [cit. 2013-04-11].
Dostupné z: <http://www.bachl.cz/>
- [6] RobexPedic - Tavné řezání polystyrénů. ROBEX DK, s.r.o. *Robex DK, s.r.o.* [online]. ©2006–2013 [cit. 2013-03-09].
Dostupné z: <http://robexpedic.robex-dk.cz/index.php?clanek=1264067645.php>
- [7] Industrial robot. REUTERS. *Science Daily: Your source for the latest research news and science breakthroughs* [online]. Reuters, ©2013 [cit. 2013-03-04].
Dostupné z: http://www.sciencedaily.com/articles/i/industrial_robot.htm
- [8] BROGARDH, Torgny. Present and future robot control development: An industrial perspective. Present and future robot control development: An industrial perspective [online]. 2007, roč. 31, č. 1, s. 69-79 [cit. 2013-04-12]. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.01.002](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2007.01.002).
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578807000077>
- [9] Igm India: Teach pendant. IGM. Igm India [online]. [2011] [cit. 2013-04-12].
Dostupné z: http://www.igm-india.com/?page_id=36
- [10] FANUC Spare Parts by ACE: Autocells.com. Autocells.com: Automated cells & equipment, inc. [online]. ©2013 [cit. 2013-04-12].
Dostupné z: <http://www.autocells.com/fanuc-spare-parts>
- [11] Robot controller with teach pendant - For Small Robots - TecnoMatic Robots. DIRECT INDUSTRY. DirectIndustry: The Virtual Industrial Exhibition: sensor - automation - motor - pump - handling - packaging ... [online]. © 2013 [cit. 2013-04-12].
Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/tecnomatic-robots/robot-controllers-with-teach-pendant-30488-1029723.html>

- [12] HLAVATÝ, M. Současné možnosti a trendy pro programování průmyslových robotů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Pochylý.
- [13] ABB: Robotika. *ABB Robotika* [online]. Affolternstrasse 44, 8050 Zurich, Switzerland, ©2013 [cit. 2013-03-04].
Dostupné z: <http://www.abb.com/robots>
- [14] KUKA. *KUKA: průmyslové roboty* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/
- [15] ABB. *The ABB Group: Automation and Power Technologies* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-05].
Dostupné z: www.abb.com
- [16] Landsmann s.r.o. - nářadí - nástroje - stroje: Elektrické nářadí / Řezačky na polystyren. LANDSMANN S.R.O. *Landsmann s.r.o.: nářadí - nástroje - stroje* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-14].
Dostupné z: http://www.landsmann.cz/elektricke-naradi-rezacky-na-polystyren_c5361.html
- [17] DVOŘÁK, R. *Vyřezávání plošných tvarů z polystyrenových desek pomocí průmyslového robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 55. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.
- [18] GES ELECTRONICS. *GES-ELECTRONICS: Internetový obchod s elektronickými součástkami* [online]. ©1991—2013 [cit. 2013-03-16].
Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/>
- [19] EPP Plasty: Průmyslové materiály. EPP PLASTY. *EPP Plasty* [online]. ©2012 [cit. 2013-03-17].
Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/ptfe.php>
- [20] SMC CORPORATION. *SMC Czech Rep.: Competence In Automation* [online]. ©2006 [cit. 2013-03-17].
Dostupné z: <http://smc.cz/>
- [21] ALUTEC K&K, a.s. *Alutec K&K, a.s.: Hliníkový konstrukční systém* [online]. ©2013 [cit. 2013-03-23].
Dostupné z: <http://www.aluteckk.cz/>
- [22] Kanthal LT: Kanthal. SANDVIK. *AB Sandvik Materials Technology* [online]. ©2010–2013, 2012-06-20 10:48:00 [cit. 2013-03-23].
Dostupné z: <http://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/kanthal-lt/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Graf napětí v tlaku při 2% a 10% stlačení zkušebních těles z EPS (vlevo); graf pevnosti v tahu a pevnosti v ohybu u zkušebních těles z EPS (vpravo), v závislosti na objemové hmotnosti (převzato z [1]).	6
2.1	Schéma šesti-osého robotu – pohled z boku (vlevo) a zepředu (vpravo) (převzato z [14])	11
2.2	Schéma čtyř-osého paletizačního robotu – pohled z boku (vlevo) a zezadu (vpravo) (převzato z [15])	11
2.3	Schéma čtyř-osého robotu typu SCARA – pohled z boku (vlevo) a zepředu (vpravo) (převzato z [14])	12
2.4	Schéma robota DELTA z boku (vlevo) a shora (vpravo)(převzato z [15]) . .	12
2.5	Ukázka teach-pendantu s klasickým tlačítkovým ovládáním, kde se display využívá pouze pro zobrazování informací. a) Teach-pendant od firmy Fanuc (vlevo)[10], b) Teach-pendant firmy IGM(vpravo)[9].	14
2.6	Ukázka teach-pendantu s dotykovým ovládáním, kde se pomocí displaye zadávají data. a) Teach-pendant firmy ABB(vlevo) [8], b) Teach-pendant firmy TecnoMatic[11].	14
3.1	Komerční řezačky, běžně dostupné na trhu, ruční řezačka (1100mm) s pružinovým napínáním (vlevo), modelová řezačka (140mm) napínání přes zkrutnou pružinu na cívce (převzato z [16])	17
3.2	a) Celkové schéma efektoru; b) Pohled na částečný řez úhelníkem.	19
3.3	a) Pevný bod pro uchycení drátu; b) Částečný řez kladkou pro zvýraznění konstrukčních prvků; c) Uchycení pístu na profil je realizováno plechem ohnutým do tvaru „L“.	19
3.4	Rozpad sestavy efektoru pro snazší kompletaci.	21
3.5	Dvě části příruby. a) část příruby na robot, b) mezi-příruba na efektor. . . .	22
3.6	Schématické znázornění tečné rychlosti efektoru při rotaci kolem bodu umístěného mezi rameny efektoru.	23
4.1	Schéma robotu Kuka KR16. a) pohled zboku; b) pohled zepředu (model robotu převzat z [14])	25
4.2	CAD model sestavy s robotem a uchyceným efektozem	26
4.3	Graf závislosti prodloužení drátu na výkonu zdroje.	28
4.4	Schéma měření odchylky drátu s naznačenými rozměry a působícími silami	29
4.5	Graf hodnot odchylky drátu od výchozí polohy pod zatížením v závislosti na tlaku pístu proložený aproximační křivkou	29
4.6	Graf závislosti odchylky drátu na výkonu zdroje	31
4.7	Experimentální dráha řezání.	32
4.8	Porovnání řezu a) bez napínání; b) s napínáním pomocí válce za tlaku 0,3MPa; c) srovnání řezů – červeně označená diference	32

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled odporových drátů a jejich vlastností pro ϕ 0,5mm (převzato z [18])	7
3.1	Tabulka základních parametrů pneumatického válce CD55B25-25M (převzato z [20])	20
3.2	Základní fyzikální vlastnosti kanthalu pro drát ϕ 1mm. (Převzato z [22]) . .	20
3.3	Faktor el. odporu v závislosti na teplotě pro drát ϕ 1mm. (Převzato z [22])	20
3.4	Tabulka tepelné roztažnosti α pro drát ϕ 1mm. (Převzato z [22])	20
4.1	Tabulka základních vlastností stabilizovaného laboratorního zdroje Diametral	26
4.2	Tabulka naměřených dilatací drátu Kanthal Φ 0,68mm	27
4.3	Tabulka naměřených odchylek drátu Δv a vypočítaných hodnot β (podle vztahu (4.5)), F_t (podle vztahu (4.7)), F_n (podle vztahu (4.6)) a F_c (podle vztahu (4.8)).	29
4.4	Tabulka hodnot odchylky drátu od výchozí polohy za konstantního zatížení a tlaku v pístu s proměnným výkonem zdroje.	30

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

Značka	Jednotky	Název	Popis
d	mm	Průměr	Průměr pístnice pneumatického válce
D	mm	Průměr	Vnitřní průměr válce pneumatického válce
F_c	N	Celková síla	Celková síla, působící na drát při napínání s normálovým zatížením
F_G	N	Tíhová síla	Tíhová síla závaží, působícího normálově na drát
F_n	N	Napínací síla	Napínací síla, způsobená pneumatickým válcem
F_t	N	Tahová síla	Tahová síla, vyvolaná normálovým zatížením drátu
g	$m \cdot s^{-2}$	Gravitační zrychlení	
I	A	Proud	Elektrický proud laboratorního stabilizovaného zdroje
k_i	/	Směrnice přímky	Směrnice aproximační přímky 1.řádu
\bar{k}	/	Aritmetický průměr směrnice přímky	Aritmetický průměr směrnic aproximačních přímek 1.řádu
l_c	mm	Celková délka	Celková délka drátu mezi pevnými ukotveními
l_e	mm	Efektivní délka	Efektivní délka drátu mezi pevným ukotvením a kladkou – délka, jež může být využita pro řezání
Δl	mm	Prodloužení	Prodloužení drátu
m	kg	Hmotnost	Hmotnost závaží pro zatížení drátu
p	MPa	Tlak	Tlak v soustavě, pohánějící pneumatický válec
P	W	Výkon	Výkon laboratorního stabilizovaného zdroje
R	Ω	Odpor	Odpor drátu
S	m^2	Plocha	Plocha pístu pneumatického válce
T	K	Teplota	Teplota drátu
U	V	Napětí	Napětí laboratorního stabilizovaného zdroje
Δv	mm	Odchylka	Odchylka drátu od výchozí polohy
α	1/K	Součinitel prodloužení	Součinitel prodloužení, v závislosti na teplotě
β	degree	Úhel odchylky	Úhel vzniklý odchýlením drátu od výchozí polohy
ϵ	1/W	Součinitel prodloužení	Součinitel prodloužení, v závislosti na výkonu zdroje

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy

Název souboru	Označení dokumentu	Popis
dokumentace.pdf	BP2013-133663/00	Výkres sestavy – Koncový efektor
	BP2013-133663/01	Výrobní výkres – Hřídel
	BP2013-133663/02	Výrobní výkres – Kladka
	BP2013-133663/03	Výrobní výkres – Kostka 1
	BP2013-133663/04	Výrobní výkres – Kostka 2
	BP2013-133663/05	Výrobní výkres – Úchyt na píst
	BP2013-133663/06	Výrobní výkres – Úhelník
	BP2013-133663/07	Výrobní výkres – Příruba efektoru
model-efektor.stp		3D model efektoru